

УДК 625.122+625.142.4

КОНСТРУКЦИЯ ТРАМВАЙНОГО ПУТИ С ЭФФЕКТОМ ГРАБЛЕЙ

Суходоев В.Н.

*Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь*

Статья посвящена проблеме введения в практику фундаментостроения конструкции ленточного трамвайного пути, преимущества которому создают двоянные внецентренно нагруженные фундаменты – полушпалы, его параметров и термина «эффект граблей». Показано, что создавая рельсовую нить с эффектом граблей в результате внецентренной укладки рельса внутрь шпалы – механизма, решаются вопросы автоматического скрепления рельса со шпалой, гашения шума и экономичности. Приведен практически значимый расчет эффекта граблей, как функции свойств основания. Дан вариант устройства ленточного трамвайного пути с эффектом граблей.

This article covers the problem of introduction the construction of Linear Railway into the practice of foundation building and the Rake Effect. Eccentrically loaded dual foundation sleepers are advantaged with their characteristics. It is shown, that the problems of automatic connection between rail and sleepers, eliminating of noise and total cost of the way can be solved by constructing railway with Rake Effect, which is the result of putting a rail inside sleepers mechanism. Practical estimation of the Rake Effect as the function of characteristics of founda-

tion bed is also shown. An example of designing Linear Railway with Rake Effect is shown in the article as well.

Эффект граблей. В современном городе много проблем создает городской транспорт. Они особенно обострились в связи с широким распространением индивидуального автотранспорта. В развитых странах пришли к выводу, что транспортные проблемы города можно решить только развивая общественный транспорт, в том числе трамвай. Однако, при всем многообразии конструкций трамвайных путей (ТП), располагаемых на упругом основании, в технической литературе нет разработанной оптимальной, сочетающей одновременно свойства бесшумности, минимальной стоимости и минимальных сроков строительства. Патентный поиск и обзор технической литературы не выявил конструкцию скрепления рельса со шпалой, которая бы автоматически реагировала на меняющиеся условия эксплуатации трамвайного пути.

Недостатки можно устранить, если для скрепления рельса со шпалой создавать автоматически регулируемое обжатие рельса с Эффектом граблей. Названию Эффект граблей соответствует существующее свойство граблей преобразовывать вертикальную нагрузку и перемещение в горизонтальную нагрузку и перемещение (рис. 1). Используя его применительно к сдвоенным фундаментам, получаем новое полезное свойство – Эффект граблей в фундаментостроении. Кроме патентов [1] и авторских статей [2, 3, 7, 8] в технической литературе по ТП отсутствует его описание, нет описания параметров и технологии его применения. Отсюда – актуальность темы и необходимость ее разработки. Польза эффекта граблей в фундаментостроении показана далее по тексту на примере ленточного трамвайного пути (ЛТП).

Эффект граблей в фундаментостроении (далее ЭГ) – результат преобразования сдвоенными фундаментами (рычагами) вне центра сечения нагруженными вертикальной силой реакции и крена (наклона) их основания в горизонтальные силы и перемещения. Поэтому горизонтальные свойства ЭГ – копия механических свойств внецентренно нагружаемого основания.

Очевидно, что чисто упругое поведение зернистой среды возможно лишь при очень небольших ее перемещениях, сообщаемых внешним много кратным воздействием. Речь идет о долях милли-

метров, т.е. о величинах обычно не учитываемых в геотехнической практике [5]. Однако, подобные малые перемещения и есть необходимая и достаточная величина для проявления ЭГ по перемещениям. Гарантия в том, что нет абсолютно недеформируемых оснований, среди которых лучше подходит упругое основание: на нем ЭГ по перемещениям будет обеспечен и будет работать.

Параметры ЭГ по прочности характеризуются горизонтальными силами встречного взаимодействия сдвоенных тел (полушпал), которые проявляются через третье тело. Для третьего тела (рельс с вертикальными прокладками) равнодействующая сила – сила обжатия. ЭГ по горизонтальным перемещениям – перемещения верха полушпал. Расчетные значения ЭГ по перемещениям имеют горизонтальные W_T перемещения на уровне равнодействующей горизонтальных сил в верхней части рельсовой нити (РН) и на этом же уровне – ее числовое значение (сила $F_{об}$).

Методика исследований ЭГ состоит в использовании научно-технического направления в научно-исследовательской работе: установить неизвестные ранее определенные закономерности или свойства на основе решения технических задач при устройстве рельсовых путей. Полученные таким образом закономерности не смогут претендовать на окончательные положения по проблеме, но явятся основой для научных исследований по выработке теории Эффекта граблей, докажут полезность ЭГ.

Ленточный трамвайный путь строится с использованием специфики устройства трамвайных путей с ЭГ. Отличительная сторона ЭГ обусловлена возможностью автоматического скрепления рельса со шпалой за время эксплуатации и большом разбросе параметров грунтовых условий на трассе. Сдвоенные полушпалы (ПШ) на гибкой связи образуют шпалу – механизм (Ш-М) с возможными свойствами как тисками сжимать рельс на длине $2 l'_o$ (длина $2 l'_o$ – размер сжатой зоны основания и шейки рельса вдоль пути) в процессе наезда, либо отпускать его при откате. Сдвоенные ПШ с рельсом внутри образуют равной жесткости РН и под нагрузкой колеса (величиной от нуля к max значения и наоборот) соответствующую необходимую силу для обжатия рельса. Крен ПШ с обжатием рельса образуется с частотой продольных и поперечных циклов равной частоте движения трамвая. А т.к. ПШ срабатывают как рычаги, преобразующие вертикальную нагрузку и перемещения в горизон-

тальные нагрузки и перемещения, то в блоке из двух ПШ они выполняют обжатие рельса силой $F_{об}$. Здесь верх рычага опирается на рельс через прокладку, низ на основание.

Две РН образуют трамвайный путь, состоящий из бесконечной длины лент, с названием ленточный трамвайный путь (ЛТП) (рис. 1). В поперечном сечении каждая из двух внецентренно нагруженная полушпала срабатывает аналогично сельхоз граблям, на которые наступают. Отсюда этот термин – Эффект граблей.

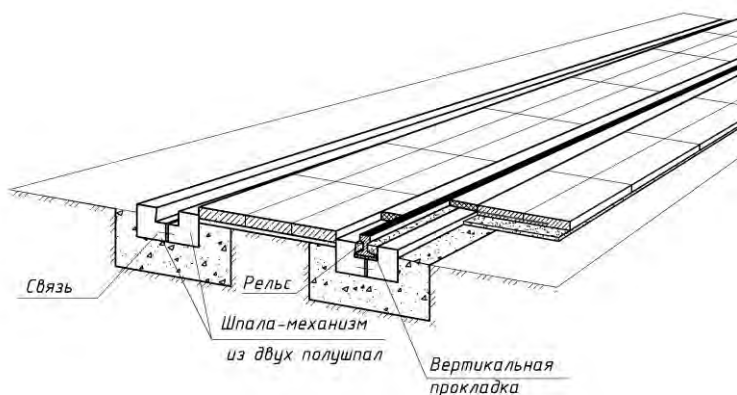


Рис. 1. Ленточный трамвайный путь

Стабильность проявления ЭГ гарантируют не только прочностные и деформационные характеристики основания рельсовой нити, но и усиливающие ее факторы. Так, по оси рельсовой нити в основании двух ПШ, где зазором определяется расстояние между ними, увеличению возможного крена к оси рельса и силы его обжатия способствует накладка их напряженно деформированных состояний и еще факторы всегда работающие:

1. Рельсовая нить в поперечном направлении под нагрузкой распределенной или сосредоточенной посередине ее работает как гибкий железобетонный фундамент.

2. К. Терцаги отметил, что посередине загруженной площади основание имеет большую осадку, чем участки по ее краям. Титов и Хромов [3] экспериментально установили: по оси рельсового пу-

ти с поперечным расположением шпал упругие осадки основания в 2–2,5 раза больше осадок основания по оси *рельса*.

3. Для уплотненного основания подходит рекомендация, которая следует из заключения Мелентьева Л.П. [4]. Он пишет, что сужение ширины нижней постели брусьев до 21 см недопустимо, т.к. в этом случае удельная осадка (мм на 1 млн т) увеличивается на 30 % по сравнению с осадкой при ширине 23 см, на 51% по сравнению с шириной 25 см и на 66 % с шириной 27 см. Следовательно, сужение постели ПШ до 22–24 см способствует увеличению их общих осадок, из которых сохраняются упругие деформации основания в случае многократного нагружения.

В ЛТП сила скрепления рельса со шпалой проявляется как функция динамической нагрузки от колеса вагона, и т.о. придаются нагрузке новые полезные функции: обеспечить плотный контакт рельса с ПШ в горизонтальном направлении [1]. Плотный контакт рельса с полушпалами формируется встречным смещением горизонтальных сил скрепления рельса со шпалой по мере исключения пластических деформаций при уплотнении основания, выборе щелей между шейкой рельса, вертикальными прокладками и Ш-М. Затем ПШ, преобразуя вертикальную нагрузку, зажмут рельс и тем сильнее, чем больше нагрузка на них. Такое жесткое скрепление передаст и перераспределит на железобетонную Ш-М, а та на балласт энергию колеблющегося рельса. При этом концевые участки Ш-М зависнут на рельсе в местах стыковки, а в местах стыка рельсов концы их получат надежную опору на железобетонной шпале- механизме, обеспечивая ровную поверхность качения колеса.

Практически установлено, что величина горизонтальной опрокидывающей рельс силы не превышает 20–25 % вертикальной нагрузки, поэтому $F_{об} \geq 0,25F$ для безопасной работы ленточного трамвайного пути, удержания трамвая, гашения шума. Здесь F – нагрузка от колеса вагона.

Пространственную устойчивость рельсовой нити (коэффициент устойчивости на опрокидывание рельса Р43 в Ш-М в любом состоянии ЛТП равен 3,26, а только рельса Р43 соответственно 1,63) и стабильность ширины колеи обеспечивают укладка рельса внутрь Ш-М с эксцентриситетом в сторону оси пути вместо монтажа рельса с наклоном, как на пути с рельсо-шпальной решеткой (РШР), свойства равно прочности и равно жесткости ЛТП.

Горизонтальная жесткость РН в 60–70 раз больше горизонтальной жесткости одиночного рельса на уровне его нейтрального слоя. Поэтому головка рельса в ЛТП имеет опору не только на колесную пару (изнутри ЛТП), но и на верхнюю часть Ш-М, что обеспечивает поперечную устойчивость его, рельсовых нитей и предупреждает развитие болтанки рельса и вагона.

В случае проникновения воды (толщина вертикально расположенного слоя не превысит доли миллиметра) между стенками шпаль-механизма, прокладками и шейкой рельса и ее замерзания, усилятся обжатие рельса (замерзание воды сопровождается увеличением объема) на большем расстоянии, но ненадолго, т.к. ледовое сцепление разрушится при движении трамвая.

Ремонтная служба периодически восстанавливает упругие свойства основания, основная причина их нарушения – загрязнение балласта. В конструкции ЛТП балласт накрыт от загрязнения сплошной рельсовой ниткой.

Шум. Усиленное гашение вибрации рельса (и шума от нее) в зоне приложения динамической нагрузки на ЛТП осуществляется демпфированием и звукоизоляцией его железобетонными полушпалами. В любой другой конструкции ТП энергия колеблющейся механической системы рельс – основание усиленно не гасится в горизонтальной плоскости, что сравнительно с ЛТП удлинит время и эффективность гашения.

Связанное с положением нагрузки изменение суммарной жесткости РН из отдельных слоев, сказывается на уменьшении шума т.к. каждый слой РН колеблется с разной амплитудой и потому препятствует с ним контактирующим слоям достигать резонанса.

Сравнительно с жесткостью рельса в трамвайном пути на РШР вертикальная жесткость рельсовой нити в ЛТП в 3–4 раза больше, но меньше в 12–15 раз излишней жесткости ТП на сплошной железобетонной плите. ЛТП – гибкая конструктивная схема и работает как балка на упругом основании, т.е. совместно с балластом гасит механические колебания рельса и шум. В ЛТП упругие прокладки под подошвой и по бокам рельса служат ему демпфером, а для Ш-М – амортизатором, т.к. смягчая удары, защищают ее.

Количественную оценку ЭГ разработаем на примере ЛТП. Базовый вариант ТП – это трамвайный путь на рельсошпальной решетке, его внедрение и всесторонние исследования осуществляются

с XIX века, поэтому с ним целесообразно сравнивать параметры и эффективность ЛТП. Вначале размер B ширины Ш-М можно получить путем ее сравнения с площадью подошвы применяемых на рельсошпальной решетке поперечно расположенных шпал. На РШР деревянная шпала длиной $l_{ш} = 2,7$ м шириной $b_{ш} = 0,20$ м при количестве 1680 штук на один километр пути имеет площадь подошвы $A_{п} = 1680 \cdot 2,7 \cdot 0,20 = 907,2 \text{ м}^2$, на один метр пути $A_{п1} = 0,907 \text{ м}^2$, и под одну рельсовую нить $A_{п1}/2 = 0,907/2 = 0,46 \text{ м}^2$. Это при ширине шпалы - механизма $B = 0,46$ м (рис. 2).

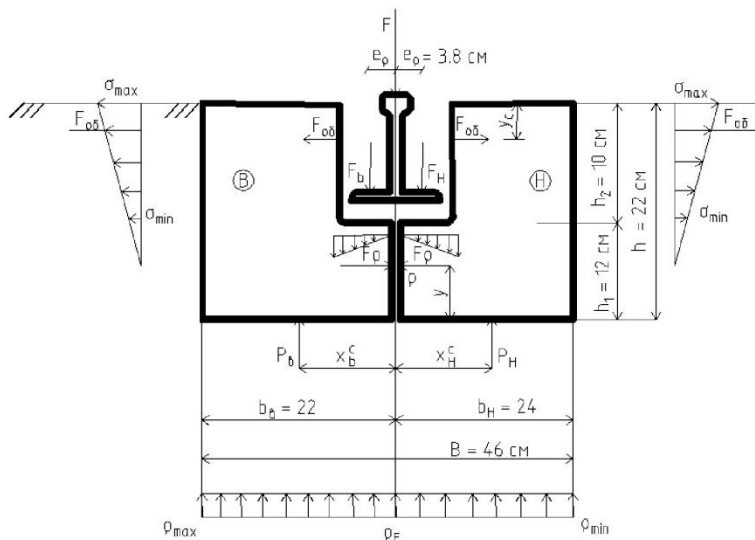


Рис. 2. Сечение Ш-М. Вариант для трамвайного пути. Расчетная схема

Если на ЛТП жесткость P_H будет сравнима с жесткостью применяемых рельсов на РШР, тогда размеры сжатой зоны основания $2l'_o$ пути различной конструкции будут одинаковыми, их можно сравнивать. По мере удаления от колеса образуется волна прогибов БУО, возможно и вибрации, но сильно ослабленной не постоянством жесткости, а потому в расчетах принято допущение (в запас), что от нагрузки сжатие испытывает только первый участок волны $2l'_o$. Непостоянство жесткости обусловлено тем, что по мере приближения колеса – постепенное суммирование параметров включа-

емых слоев РН, а по мере удаления колеса – постепенное вычитание параметров выключаемых слоев РН. Расчетной принята конструкция РН под колесом с названием цельная. Отсюда второе допущение: вдоль Ш-М и полупал распределение напряжений в балласте и основании от сосредоточенной нагрузки, которую создает колесо вагона, принимается обобщенно по треугольнику (вместо волнообразного). При определении длины $2l'_o$ использованы результаты натурных испытаний аналогично нагруженного участка железной дороги: при нагрузке 105 кН на колесо ее сжатая полудлина $l'_o = 1,05\text{--}1,1$ м в обе стороны от контакта колеса с рельсом (опыт Смолина Ю.П.) [6]. Жесткость ж.д. рельса Р50 $EI_{50} = 2 \cdot 10^{11} \cdot 2011 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4 = 4022 \cdot 10^3 \text{ Нм}^2 = 4,022 \cdot 10^6 \text{ Нм}^2 = EI_1$. Жесткость составной железобетонной рельсовой нити ЛТП с рельсом Р43 $E_{ш}I_{ш} = 11,55 \text{ МНм}^2 = EI_2$ или в 2,9 раза больше.

Обобщенно прогиб от сосредоточенной силы определяется по формуле $y_i = F_i l_i^3 / n_i E_i I_i$. А используя решение для общего случая длин консолей l_1 и l_2 балки по обе стороны от ее сечения, защемленного в зоне контакта приложения нагрузки от колеса на рельс, рассчитываем их соотношение как функцию жесткости участков этих длин.

$$\frac{F_1 \cdot l_1^3}{n \cdot E_1 \cdot I_1} = \frac{F_2 \cdot l_2^3}{n \cdot E_2 \cdot I_2}. \text{ Отсюда } l_2 = \sqrt[3]{\frac{F_1 \cdot E_2 \cdot I_2}{F_2 \cdot E_1 \cdot I_1}} \cdot l_1.$$

В решаемой задаче $y_i = 2 \text{ мм} = \text{const}$, $n = \text{const}$, $I_1 = I_2$, $F_1 = 105 \text{ кН}$, $F_2 = 70 \text{ кН}$. Из равенства прогибов $105 \cdot 10^3 \cdot l_1^3 / n \cdot 4,022 \cdot 10^6 = 70 \cdot 10^3 \cdot l_2^3 / n \cdot 11,55 \cdot 10^6$ получаем рабочую полудлину *сжатой зоны Ш-М* $l_2 = \sqrt[3]{4,31} \cdot l_1 = 1,62 \cdot l_1$. $l_1 = l'_o = l_2 = 1,62 \cdot 1,05 = 1,7 \text{ м}$. $2 l'_o = 3,4 \text{ м}$.

Прямоугольной формы выбираем *поперечное сечение* РН. Толщину бетона под подошвой рельса принимаем исходя из толщины железобетонной шпалы, применяемой при устройстве пути на РШР. Ее толщина равна 11–16 см. Для закрепления рельса в железобетоне ПШ необходимо сверху между ними устроить канавку высотой 10 см. При этом высота Ш-М составит $h = 22\text{--}26$ см. Стремимся также к тому, чтобы расход железобетона на устройстве ЛТП не был больше того, что идет на РШР, а это при $h = 22$ см. Ширину ПШ делаем разной: внутренняя $b_{вн} = 22$ см, наружная $b_{н} = 24$ см

с целью обеспечить внецентренное нагружение основания Ш-М и, как вариант, принимаем размеры Ш-М под трамвайный путь, показанные на рис. 2.

Согласно принципу освобождаемости тел от связей, можно от распределенных по площади нагрузок перейти к сосредоточенным силам, что значительно удобнее и нагляднее для анализа сил, взаимодействующих по сечению рельсовой нити и для решения практических задач ЭГ (см. рис. 2) по прочности.

Расчет ЭГ по прочности (**расчет силы обжатия** $F_{об}$) просто сделать через условие прочности одной полушпалы. Например, наружной. Изгиб рельсовой нитки в поперечном направлении происходит под действием внешнего изгибающего момента $M_u^p = P_n \cdot (x_n^c - e_p)$. По условиям равновесия внешний момент уравнивается моментом, который создает сила обжатия $M_{об}^p = F_{об} \cdot h_o = F_{об} \cdot (h - y - y_c)$. Из формул моментов M_u^p и $M_{об}^p$ относительно горизонтальной связи ПШ (центр поворота) следует, что их величины зависят от геометрических параметров полушпал и их соотношений, а из их равенства получается формула расчета эффекта граблей по прочности $F_{об}$:

$F_{об} = P_n (x_n^c - e_p) / (h - y - y_c)$ (см. рис. 2). Можно представить продольную эпюру распределения контактных сжимающих напряжений в основании Ш-М по прямоугольнику ($0,5 \cdot l'_0 \cdot p_{max} \cdot 2 = p_{max} \cdot l'_0$). Тогда производится расчет краевого давления на балласт под Ш-М, как под жестким внецентренно нагруженным фундаментом, при $F = 70$ кН, $B = 0,46$ м, $e = 0,01$ м, $2 \cdot l'_0 = 3,4$ м:

- наибольшего $p_{max} = -70 \cdot 10^3 / 3,4 - 0,46 \cdot 0,5 - 70 \cdot 10^3 \cdot 0,01 \cdot 6 / 3,4 \cdot 0,46^2 \times 0,5 = (-89514 - 11676)$ Па = $-0,101$ МПа < $-0,15$ МПа (по балласту).

- наименьшего $p_{min} = (-89514 + 11676)$ Па = $-0,078$ МПа. По приведенным данным равнодействующая реактивного давления на подошву наружной ПШ составила $P_n = 34,27$ кН < $F/2$.

Для наглядности в табл. 1 представлен пример числовых значений $F_{об}$, как функции, внецентренно приложенной нагрузки P_n на РН, ее геометрических размеров B и h , расположения горизонтальной связи y по высоте сечения.

Вывод – увеличение высоты Ш-М ведет к уменьшению силы обжатия, если $B, h = const$, а увеличение y – рост $F_{об}$.

Таблица 1

Значения $F_{об}$, рассчитанные применительно к участку РН
длинной l_0' равномерно нагруженному

P_H , кН	B , см	h , см	y , см	y_c , см	$F_{об}$, кН
34,27	46	22	3	4,41	19,94
			6	4,24	24,73
			9	3,96	32,18
		26	3	4,54	15,76
			6	4,44	18,69
			9	4,311	22,92

В целях выявления возможности сокращения вычислительной работы при решении задачи без осевой симметрии ($b_{вн} = 22$ см, наружная $b_n = 24$ см), произведен расчет $F_{об}$ по округленным числовым данным (осевая симметрия РН) на полушпалы $P_H = 0,5F = 35$ кН (вместо 34,27 кН), $x_n^c = 0,5b_n = 12$ см (12,29 см), e_p равен 33 % от ширины подошвы рельса ($11,4 \cdot 0,33 = 3,8$ см, т.е. совпадает по величине). В результате $F_{об} = \frac{70}{2} \cdot \frac{24 - 11,4 \cdot 0,33}{22 - 6 - 4,33} = 24,7$ кН, что практически соответствует табличному значению $F_{об} = 24,73$ кН и вывод о применимости расчета $F_{об}$ рельса в Ш-М прямоугольного сечения по округленным значениям входящих в нее параметров и осевой симметрии РН.

В расчетах на прочность сосредоточенная нагрузка через рельс на железобетонные поперечные шпалы длиной $l_{ш} / 2$ принята равной $F = 70$ кН (для трамвая с учетом коэффициента динамичности нагрузки $K_d = 1,4$), а β , l'_o , y_{max} определяются по формулам расчета БУО, используя гипотезу Фусса-Винклера $\beta = \sqrt[4]{K/4EI}$,

$$l_o = \pi/\beta, \quad l'_o = 0,75 \cdot l_o, \quad y_{max} = -F\beta/2K, \quad M_{max} = F/4\beta.$$

Следует отметить, что значение l'_o , рассчитанное по формуле на основе гипотезы Фусса-Винклера, несколько больше значения $l'_o = 1,7$ м, подсчитанного методом сравнения с учетом опытных

данных Смолина Ю.П. (в сторону увеличения надежности и подтверждения достоверности результатов для целей практики). Еще меньше наружная консоль шпалы рельсошпальной решетки, хотя с торца шпалы может начинаться откос насыпи.

Таблица 2

Результаты расчета рельсовой нити, как БУО, на нагрузку $F = 70$ кН по приведенным формулам и числам

Коэф. постели, К, МПа	Бетон С 25/30							
	БУО из Ш-М и рельса (средняя часть)				БУО из ШМ под стыком рельсов (без учета жесткости рельса)			
	$EJ \cdot 10^6$, Нм ²	u_{max} , мм	M_{max} , кНм	l'_0 , м	$EJ \cdot 10^6$, Нм ²	u_{max} , мм	M_{max} , кНм	l'_0 , м
12	16,245	1,95	26,12	3,52	13,265	2,01	25,36	3,41
92	16,245	0,415	16,06	2,16	13,265	0,438	15,22	2,05
	Бетон С 12/15							
12	12,368	2,07	24,65	3,32	9,388	2,19	23,27	3,13
92	12,368	0,45	14,96	2,02	9,388	0,475	14,00	1,88

ЭГ зависит от свойств не только цельной РН, но и лент ее составляющих. Жесткости слоев и тем больше, чем больше различие в их величинах, влияют на перераспределение между слоями РН изгибающего момента M_{max} , прогибов u_{max} , длины $2l'_0$. С одной кривизной слоев ($1/p = \text{const}$) в зоне скрепления рельса со шпалой работает составная рельсовая нить из рельса и Ш-М, поэтому соотношение параметров между слоями РН можно регулировать по формуле $M / EI = M_p / E_p I_p = Mu / E_u * I_u = 1/p = \text{const}$. Например, под нагрузкой образующийся изгибающий РН момент перераспределяется между рельсом и Ш-М, а так как Ш-М имеет большую жесткость, соответственно воспримет большую, чем рельс, часть общего момента. Аналогично Ш-М и балласт. В ЛТП уменьшается роль рельса по вопросам прочности и жесткости РН, следовательно, массу рельса можно уменьшить

и экономить металл. Происходит автоматическое перераспределение величины силы механических колебаний между рельсом и Ш-М, а Ш-М – с балластом. Возрастает роль балласта в процессе гашения шума.

Эффект граблей по перемещениям (поперечное направление) служит для того, чтобы не произошло преобразование равнодействующей $F_{об}$ горизонтальных сил при многократной загрузке рельсовой нити подвижной переменной динамической вертикальной силой в неподвижную силу F_r (реакция опоры), как на абсолютно жестком недеформируемом основании. Если не будет ЭГ по деформациям – не будет обжатия рельса и, т.к. рельс испытывает прогиб в одном месте и одновременно выгиб в другом, тогда его вибрацию, возникающую при прохождении вагона и шум от нее, не удастся погасить. Рельсовая нить расшатается: дестабилизируется ширина колеи, усилится болтанка вагона и шум (пример, состояние ТП с вклеенным рельсом на ул. Я.Коласа в Минске). По данным табл. 2 можно заключить, что по мере уплотнения балласта и грунта в процессе эксплуатации пути произойдет разгрузка составной балки, уменьшение длины l'_0 вертикальных прогибов y_{max} и также зависящих от них горизонтальных перемещений W_r полушпал.

Возможные перемещения W_r в горизонтальном направлении на уровне равнодействующей сил обжатия $F_{об}$ можно определить по правилу рычага как функцию прогиба y_{max} .

Например. Если $h = 220$ мм, $y = 60$ мм, $y_c = 43$ мм, а упругая осадка $y_{max} = 0,45$ мм (табл. 2), тогда из условия пропорциональности:

$$\frac{W_r}{h - y_0 - y} = \frac{y_{max}}{y} \Rightarrow W_r = 0,88 \text{ мм.}$$

Но перемещения совместно работающих П-Ш ограничены величиной упругих деформаций тонких вертикальных боковых прокладок $\delta_{пр} = 0,01$ м с модулем $E_{пр}$ между рельсом и внутренними гранями Ш-М на расчетном участке длиной l'_0 высотой h_2 , сжимаемых силой $F_{об}$

$$\Delta = \frac{F_{об} \delta_{np}}{E_{np} h_2 l_0'} = \frac{24,73 \cdot 10^3 \cdot 0,01}{0,8 \cdot 10^9 \cdot 0,1 \cdot 1,7} = 1,82 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 1,82 \cdot 10^{-3} \text{ мм} \ll 0,88 \text{ мм}.$$

При этом минимальная необходимая упругая осадка S_B по вертикали шпалы-механизма по правилу рычага составит часть Δ (обратная задача).

$$S_B = \frac{1,82 \cdot 10^{-6}}{1,39} = 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 1,31 \cdot 10^{-3} \text{ мм} \ll 0,45 \text{ мм}.$$

В формуле число 1,39 получено делением P_n на $F_{об}$ при $y = 6$ см. Рассчитанная (табл. 2) осадка РН $S_B = Y_{max} = 0,45$ мм, что в 343 раза превышает необходимую для развития ЭГ по перемещениям, а потому с большой гарантией, перекрывая некоторую ориентировочность числовых расчетов, эффект граблей будет работать.

И, т.к. резервные возможности ПШ по горизонтальным перемещениям значительно превышают не только начальные упругие деформации прокладок, но и возможные в процессе длительной эксплуатации их упруго пластические деформации, поэтому полушпалы будут зажимать рельс силой $F_{об}$, обеспечат целостность рельсовой нити и совместную работу всех ее элементов, в том числе крен П-М и горизонтальные перемещения головки рельса.

Заключение

1. Для решения накопившихся противоречий между экологией и практической транспортной потребностью города в дешевом, надежном и бесшумном трамвае следует использовать Эффект граблей. Ленточный трамвайный путь с Эффектом граблей - гарантия не только существования ЭГ, но простоты его разработки для практического применения. Упругие деформации автоматически проявятся на упруго деформируемом основании при решении таких задач как автоматическое регулирование ширины колеи, автоматическое скрепление рельса со шпалой — механизмом, автоматическое гашение вибрации и шума.

2. $F_{об} = P_n (x_n^c - e_p) / (h - y - y_c)$, т.е. выявлена пропорциональная зависимость Эффекта граблей по прочности от величины внецентренно приложенной нагрузки (на любой из сдвоенных фундаментов), разности эксцентриситетов этой нагрузки и равнодействующей реактивного давления по горизонтали и обратно пропорциональной зависимости от расстояния по вертикали между вектором

$F_{об}$ и положением связи сдвоенных полушпал, образующих Ш-М. Она открывает возможности для оптимизации размеров и технологии устройства ленточного трамвайного пути.

3. ЭГ по перемещениям, направлению наклона полушпал и рельсовой нити создаются (т. к. нет абсолютно жестких материалов) внецентренным нагружением, а величина их работы в упругой стадии это гарантия постоянства необходимой величины перемещений, автоматически сопутствующей ЭГ по прочности и не нуждается в расчете.

4. Для гашения разного уровня шума, передаваемого рельсом, нужно регулировать величину силы $F_{об}$ его обжатия, меняя значения u , либо ширину шпалы-механизма, либо ее вес.

5. Преимущества технологии ЛТП позволяют стоимость его строительства снизить до двух раз сравнительно со стоимостью ТП на рельсошпальной решетке за счет экономии рельсовой стали и крепежных деталей. Автоматическое регулирование силы скрепления рельса со шпалой-механизмом исключает расходы на его обслуживание. Можно уменьшить сроки строительства километра пути до одной-двух недель в результате поточной механизации одними механизмами однотипных лент его конструктивных элементов (тип конвейера).

Литература

1. Патент Республики Беларусь № 3262 от 23.11.99 и патент Российской Федерации № 2177061 от 20.12.01.

2. Суходоев, В.Н. О надежности и долговечности ленточного трамвайного пути / В.Н. Суходоев // Перспектива развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров в Республике Беларусь: междунар. сб. науч. тр. – Гомель : УО «БелГУТ», 2005. – С. 120–122.

3. Титов, В.П. Прибор для измерения упругих осадок земляного полотна при проходе транспорта. / В.П. Титов, В.И. Хромов // Труды к V111 Международному конгрессу по механике грунтов и фундаментамостроению. – М : СИ, 1973. – 205 с.

4. Мелентьев, Л.П. Об оптимальном соотношении механических свойств элементов верхнего строения пути / Л.П. Мелентьев / Совершенствование конструкций пути и стрелочных переводов //

Труды ЦНИИ МПС. – М. : Транспорт, 1973. – Вып. 501. – С. 31–35.

5. Соболевский, Д.Ю. Прочность и несущая способность дилатирующего грунта / Д.Ю. Соболевский. – Минск: Навука і тэхніка, 1994. – 232 с.

6. Смолин, Ю.П. Напряжения в земляном полотне от поездной нагрузки / Ю.П. Смолин // Известия вузов. Строительство. – 1997. – №7. – С. 98–101.

7. Суходоев, В.Н. Ленточный путь избавления от грохота / В.Н. Суходоев // Ахова працы. – Минск. – 2001. – №6. – С. 28–29.

8. Суходоев, В.Н. О прочности скрепления рельса со шпалой механизмом в ленточном трамвайном пути / В.Н. Суходоев // Инновационные технологии в строительстве автомобильных дорог, мостов и подготовке инженерных кадров в Республике Беларусь: Материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БНТУ, 2008. – С. 356–367.